

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-061272

(43)Date of publication of application : 28.02.2003

(51)Int.Cl.

H02K 1/14
B62D 5/04
H02K 1/27
H02K 21/16
// H02K 1/16

(21)Application number : 2001-242062

(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 09.08.2001

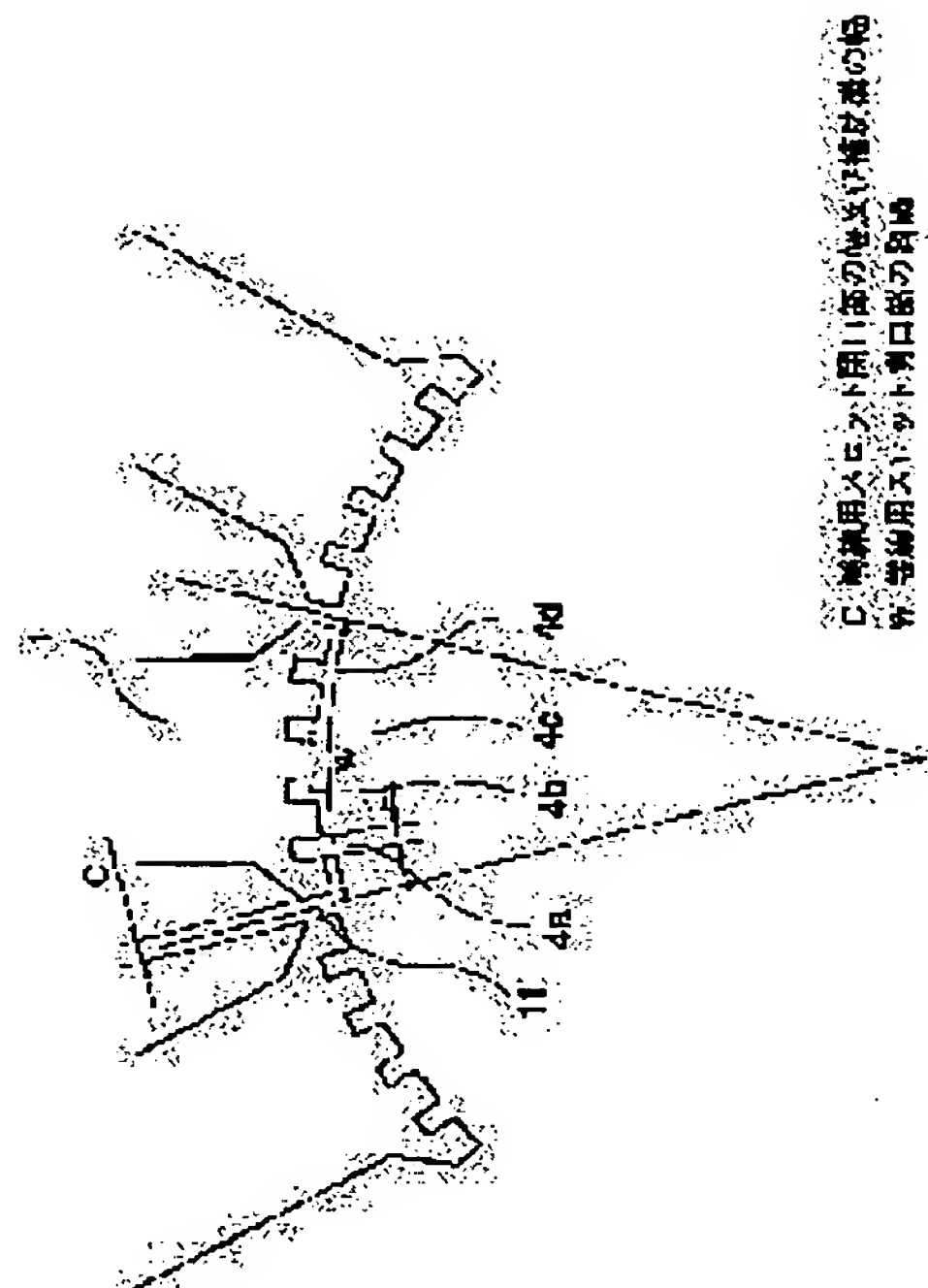
(72)Inventor : NAKANO MASATSUGU
YONEKATA HIDEKI
OKAZAKI MASABUMI

(54) PERMANENT MAGNET DYNAMO-ELECTRIC MACHINE, AND ELECTRIC POWER STEERING DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a permanent magnet dynamo-electric machine which can raise the performance, by reconciling the reduction of cogging torque and the reduction of torque pulsation at load, and to provide an electric power steering device.

SOLUTION: This motor is equipped with a rotor 8 which has a plurality of magnetic poles of permanent magnets 6 arranged at specified intervals in circumferential direction, and a stator 5 which has a plurality of salient poles arranged at specified intervals in circumferential direction in opposition to the permanent magnets 6. This is provided with four pieces of auxiliary grooves 4a-4d at the face opposed to the permanent magnet 6 of the salient pole 1, and the circumferential width of the auxiliary grooves 4a-4d is the same or roughly the same as the width of the opening 11 of a slot 3 for winding. The circumferential intervals among the auxiliary grooves 4a-4d are roughly equal, preferably equal in circumferential direction in conformity to the opening 11 of the slot 3 for winding. When defined that the circumferential interval of the opening 11 of the slot 3 for winding is W, the circumferential width of the opening 11 of the slot 3 for winding and the circumferential width of the auxiliary grooves 4a-4d are c, $0.040 < c/W < 0.125$.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 08.12.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

(51)IntCl. ⁷	識別記号	F I	テ-マコ-ト*(参考)
H 0 2 K 1/14		H 0 2 K 1/14	Z 3 D 0 3 3
B 6 2 D 5/04		B 6 2 D 5/04	5 H 0 0 2
H 0 2 K 1/27	5 0 1	H 0 2 K 1/27	5 0 1 A 5 H 6 2 1
21/16		21/16	M 5 H 6 2 2
// H 0 2 K 1/16		1/16	C
審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 10 頁)			

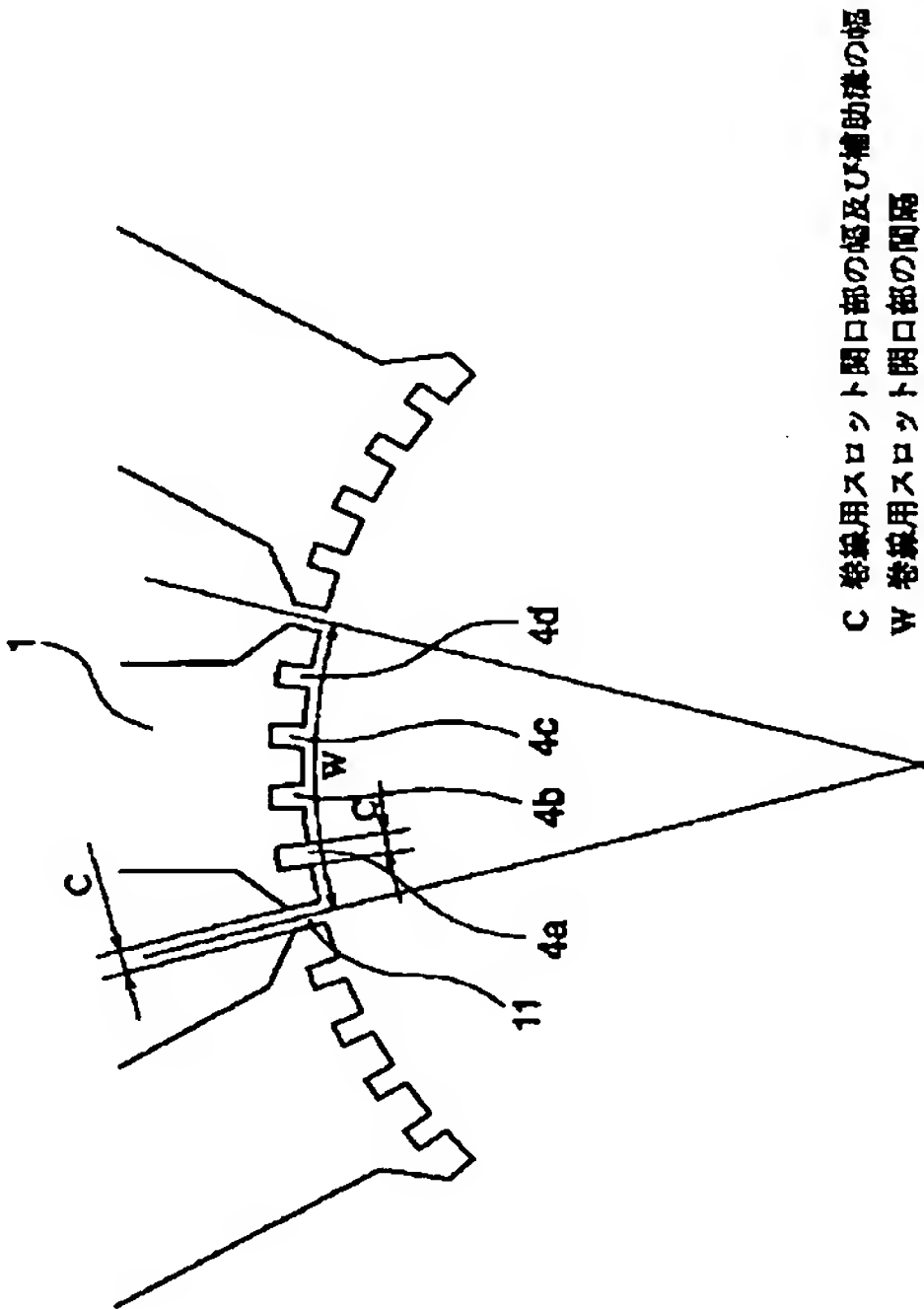
(21)出願番号	特願2001-242062(P2001-242062)	(71)出願人	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
(22)出願日	平成13年 8 月 9 日 (2001. 8. 9)	(72)発明者	中野 正嗣 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三 菱電機株式会社内
		(72)発明者	米賀多 秀樹 東京都千代田区大手町二丁目6番2号 三 菱電機エンジニアリング株式会社内
		(74)代理人	100057874 弁理士 曾我 道照 (外6名)
		最終頁に続く	

(54)【発明の名称】 永久磁石型回転電機及び電動パワーステアリング装置

(57)【要約】

【課題】 コギングトルクの低減と負荷時のトルク脈動の低減を両立させ、高性能化を図れる永久磁石型回転電機及び電動パワーステアリング装置を得る。

【解決手段】 周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石6の磁極を有する回転子8と、永久磁石6と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極1を有する固定子5とを備え、突極1の永久磁石6と対向する面に4個の補助溝4a~4dが設けられ、補助溝4a~4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部11の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝4a~4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部11と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、巻線用スロット3の開口部11の周方向の間隔をW、巻線用スロット3の開口部11の周方向の幅及び補助溝4a~4dの周方向の幅をcとすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石の磁極を有する回転子と、上記永久磁石と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極を有する固定子とを備え、

上記突極の上記永久磁石と対向する面に補助溝が4個ずつ設けられ、

上記補助溝の周方向の幅は、巻線用スロットの開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、

上記補助溝の周方向の間隔は、上記巻線用スロットの開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、

上記巻線用スロットの開口部の周方向の間隔をW、上記巻線用スロットの開口部の周方向の幅及び上記補助溝の周方向の幅をcとすると、

$$0.040 < c/W < 0.125$$

であることを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項2】 周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石の磁極を有する回転子と、上記永久磁石と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極を有する固定子とを備え、

上記突極の上記永久磁石と対向する面に補助溝が4個ずつ設けられ、

上記補助溝の周方向の幅は、巻線用スロットの開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、

上記補助溝の周方向の間隔は、上記巻線用スロットの開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、

上記突極の周方向突起部の径方向厚さをa、上記補助溝の深さをbとすると、

$$0.25 < b/a < 0.82$$

であることを特徴とする永久磁石型回転電機。

【請求項3】 さらに、上記突極の周方向突起部の径方向厚さをa、上記補助溝の深さをbとすると、

$$0.25 < b/a < 0.82$$

であることを特徴とする請求項1に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項4】 上記回転子と上記固定子との間に相対的にスキューが施され、スキュー角は電気角65度から78度の範囲であることを特徴とする請求項1から3のいずれかに記載の永久磁石型回転電機。

【請求項5】 上記スキュー角は、電気角72度であることを特徴とする請求項4に記載の永久磁石型回転電機。

【請求項6】 請求項1から5のいずれかに記載の永久磁石型回転電機を駆動源として用いることを特徴とする電動パワーステアリング装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、永久磁石型回転

電機に関するものであり、特に電動パワーステアリング装置に用いられる永久磁石型回転電機に関するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、様々な用途にコギングトルクと負荷時のトルク脈動の小さい回転電機が求められている。特に、特に電動パワーステアリング装置に用いられる回転電機に置いては、滑らかなステアリング感覚を得るためにその傾向が大である。

【0003】そして、従来から、永久磁石型電動機のコギングトルクを低減する手法として、例えば特公昭58-42707号公報には、電機子突極の界磁部と対向する位置に補助溝を設けることにより、コギングトルクを低減する技術が提案されている。そして特に、各突極に4個ずつ補助溝を設けた場合には、2個ずつ設けた場合に比較してコギングトルクの次数を大きくすることができ、コギングトルクの低減により大きな効果を発揮することが示されている。

【0004】また、特公昭58-42707号公報では、巻線用スロットと補助溝は全体として等間隔またはほぼ等間隔とすることが提案され、一方特開平10-42531号公報では、各突極に4個ずつ補助溝を設け補助溝の間隔を等間隔としないことが提案されている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、このような構成の従来の永久磁石型回転電機においては、巻線用スロットと補助溝とが全体として等間隔に設けられている、或いは等間隔に設けられていないのいずれにしても、巻線用スロットの開口部の幅が適切でないと、コギングトルクを低減出来なかったり隣り合う突極間に発生する漏れ磁束により生じる磁気飽和によって負荷時のトルク脈動が大きくなることがあった。さらに、補助溝の深さや幅が適切でないとコギングトルクを低減できない場合があった。

【0006】また、巻線用スロットと補助溝が、全体として等間隔でない場合には、コギングトルクの主たる原因となるパーミアンスの空間的な変動の高調波成分（基本波も含む）を増大させ、補助溝を設けない場合よりコギングトルクが増大してしまう問題があった。特に、特開平10-42531号公報に開示されている各突極に4個ずつの補助溝を設けた例においては、補助溝が巻線用スロットの近傍に位置しており、補助溝の幅や深さが適切でないとコギングトルクの原因となりうるパーミアンスの空間的な変動の高調波成分を大幅に増大させ結果的にコギングトルクを増大させてしまうという問題があった。また、特公昭58-42707号公報の例においては、巻線用のスロット開口部の幅と補助溝の幅が2倍程度異なるため、コギングトルクの主たる原因となるパーミアンスの空間的な変動の高調波成分（基本波も含む）を十分低減できていないという問題もあった。

【0007】この発明は、上述のような課題を解決するためになされたもので、コギングトルクの低減と負荷時のトルク脈動の低減を両立することを目的として、巻線用スロットと補助溝は全体として等間隔またはほぼ等間隔とし、さらに巻線用スロットの開口部の幅と補助溝の深さや幅を適切に設定することによって、コギングトルクの低減と負荷時のトルク脈動の低減を両立させ、高性能化を図ることができる永久磁石型回転電機、およびこの永久磁石型回転電機を駆動源として用いる電動パワーステアリング装置を得ることを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】この発明に係る永久磁石型回転電機は、周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石の磁極を有する回転子と、永久磁石と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極を有する固定子とを備え、突極の永久磁石と対向する面に補助溝が4個ずつ設けられ、補助溝の周方向の幅は、巻線用スロットの開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝の周方向の間隔は、巻線用スロットの開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、巻線用スロットの開口部の周方向の間隔を W 、巻線用スロットの開口部の周方向の幅及び補助溝の周方向の幅を c とすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ である。

【0009】また、この発明に係る他の永久磁石型回転電機は、周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石の磁極を有する回転子と、永久磁石と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極を有する固定子とを備え、突極の永久磁石と対向する面に補助溝が4個ずつ設けられ、補助溝の周方向の幅は、巻線用スロットの開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝の周方向の間隔は、巻線用スロットの開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、突極の周方向突起部の径方向厚さを a 、補助溝の深さを b とすると、 $0.25 < b/a < 0.82$ である。

【0010】また、巻線用スロットの開口部の周方向の間隔を W 、巻線用スロットの開口部の周方向の幅及び補助溝の周方向の幅を c とすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ であり、さらに、突極の周方向突起部の径方向厚さを a 、補助溝の深さを b とすると、 $0.25 < b/a < 0.82$ である。

【0011】また、回転子と固定子との間に相対的にスキューが施され、スキュー角は電気角65度から78度の範囲である。

【0012】また、スキュー角は、電気角72度である。

【0013】さらに、この発明に係る電動パワーステアリング装置は、上述の永久磁石型回転電機を駆動源として用いる。

【0014】

【発明の実施の形態】実施の形態1. 図1はこの発明の実施の形態1の永久磁石型回転電機の断面図である。また、図2は図1の固定子の突極の先端部分(3個の突極)を拡大して示す図である。図1において、1は固定子5の突極であり、本実施の形態においては12個の突極を有している。2は突極1にそれぞれ巻回される巻線である。3は巻線2が巻回されるために隣接する突極1間に形成された巻線用スロットである。4a~4dは突極1の先端部に設けられた補助溝である。この補助溝は各突極1の先端部に4個ずつ設けられている。補助溝4a~4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部の幅と同じ幅とされ、また補助溝4a~4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部と合わせて周方向に等間隔にされている。

【0015】一方、6は磁極を構成する永久磁石であり、極性の異なる磁極が交互に等間隔に配置されている。本実施の形態においては8極の回転電機としてい。7は回転軸である。回転子8は永久磁石6と回転軸7を有している。図2において、11は巻線用スロット3の開口部である。

【0016】次に、動作を説明する。永久磁石型回転電機が無負荷の状態のときに回転子8が回転すると、永久磁石6と突極1との相互作用でコギングトルクが発生する。このコギングトルクが大きいと振動の原因となり、回転電機の特性を悪化させる一因になる。また、このコギングトルクは永久磁石6の起磁力成分と固定子突極1のパーミアンスの変動成分を用いて考察することにより、回転子8の一回転あたり回転電機の極数とスロット数の最小公倍数の脈動数を持っていることが従来より解っている。そして、その最小公倍数が大きいほど、コギングトルクも小さいことが一般に知られている。

【0017】コギングトルクを低減する技術としては、固定子8の突極1の先端部に補助溝を設け、仮想的にスロット数を増やし極数とスロット数の最小公倍数を増加させるという方法がある。例えば、本実施の形態のように8極12スロットの永久磁石型回転電機においては、補助溝を各突極1に4個ずつ設けた場合には、仮想的なスロット数は60となり、極数と補助溝も含めたスロット数との最小公倍数は120となり、大幅にコギングトルクが低減できることが想定される。

【0018】しかしながら、補助溝の幅が適切でないとコギングトルクを低減出来ない場合がある。また、巻線用スロット3の開口部の幅が大きすぎるとコギングトルクが増大する。一方、逆に小さすぎると、負荷時に電機子巻線に流れる電流により生じる起磁力によって隣り合う突極1間に漏れ磁束が発生し、この漏れ磁束によって突極1に磁気飽和が生じる。そして、この磁気飽和により負荷時のトルク脈動が大幅に増加する。このようなことから、補助溝あるいは、巻線用スロット3の開口部の幅にコギングトルクと負荷時のトルク脈動が小さくなる

範囲が存在すると推測される。

【0019】本実施の形態においては、巻線用スロット3の開口部11の周方向の間隔と補助溝4a～4dの周方向の幅について考察した。まず、図2に示すように補助溝4a～4dの開口幅と巻線用スロット3の開口部11を等しくし、その幅をcとする。一方、巻線用スロット3の間隔をWとする。ここで、Wは、

【0020】

$W = \text{固定子内径（直径）} \times \text{円周率} / \text{スロット数}$

【0021】として定義する。ただし、ここで言う「スロット数」には補助溝は含まれず、巻線用スロット3のみの数である。

【0022】このcをWで除した値をパラメータとすれば、回転電機の補助溝の開口幅と巻線用スロット開口幅とスロット間隔を規格化して表現できるため都合が良い。すなわち、このパラメータに対するコギングトルクや負荷時のトルク脈動の傾向を見ることで、コギングトルクや負荷時のトルク脈動を低減するための最適な範囲を調べることが可能となる。

【0023】そこで、定格トルクが約3Nmで、通電する電流は正弦波状とする永久磁石型回転電機を設計し、 c/W に対するコギングトルクおよび負荷時のトルク脈動の変化を磁界解析によって求めた。図3はその解析結果を示す。横軸に c/W をとり、縦軸にコギングトルクの値（定格トルクに対する割合）と負荷時（ここでは定格負荷時）のトルク脈動（平均トルクに対する割合）を示す。また、実際のコギングトルクは工作誤差によって解析結果より大きな値を持つことから、設計の余裕を持たせるために図3では解析で求めたコギングトルクの3倍の値を示している。（図5、図8についても同様である。）

【0024】図3から、負荷時のトルク脈動は c/W が小さいほど、すなわち補助溝4a～4dおよび巻線用スロット3の開口幅が小さいほど大きく。 c/W が大きいほど、小さくなっていることが分かる。これは、 c/W が小さいほど、隣り合う突極間に発生する漏れ磁束により、突極の磁束密度が上昇し、トルク脈動が大きくなったと思われる。逆に c/W が大きくなるにつれて、磁気飽和が緩和されトルク脈動が小さくなったと考えられる。特に $0.040 < c/W$ の時には負荷時のトルク脈動が平均トルクの約2%以下となる。

【0025】一方、 c/W が大きいほどコギングトルクは大きい。これは、補助溝4a～4dや巻線用スロット3の開口幅が大きくなり、固定子突極1先端部のパーミアンスの脈動が大きくなったためと考えられる。また、 c/W が大きいと、等価的な空隙長が長くなり、トルクが低下することもある。 c/W が小さいほど、すなわち開口幅が小さいほど、コギングトルクが小さい傾向にあるが、これは、補助溝4a～4dや巻線用スロット3の開口幅が小さくなり、固定子突極1先端部と空隙部のバ

ーミアンスの脈動が小さくなったためと考えられる。特に、 $c/W < 0.125$ の時にコギングトルクは非常に小さく定格トルクの約0.5%になっていることが分かる。

【0026】このようなことから、この実施の形態の永久磁石型回転電機は、周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石6の磁極を有する回転子8と、永久磁石6と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極1を有する固定子5とを備え、突極1の永久磁石6と対向する面に補助溝が4個4a～4dずつ設けられ、補助溝4a～4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝4a～4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、巻線用スロット3の開口部の周方向の間隔をW、巻線用スロット3の開口部の周方向の幅及び補助溝4a～4dの周方向の幅をcとすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ とされている。

【0027】このように、巻線用スロット3の開口部の周方向の間隔Wと、巻線用スロット3の開口部の周方向の幅及び補助溝4a～4dの周方向の幅cの関係を設定することにより、固定子5の各突極1間に発生する漏れ磁束により生じる磁気飽和を緩和し、負荷時のトルク脈動を低減することができる。また、巻線用スロット3と補助溝4a～4dによるパーミアンスの脈動を低減することができ、コギングトルクも大幅に低減することが可能となる。

【0028】尚、本実施の形態においては、補助溝4a～4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部の幅と同じ幅とされ、また補助溝4a～4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部と合わせて周方向に等間隔にされているが、上述の解析結果から解るように、補助溝4a～4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部の幅とほぼ同じ幅とされればほぼ同様の効果が得られ、また補助溝4a～4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部と合わせて周方向にほぼ等間隔にされればほぼ同様の効果が得られる。

【0029】また、本実施の形態においては、各磁極を構成する永久磁石6は、全体で円筒状に構成されるものが用いられているが、各磁極は周方向に分離する独立した磁石とされても良い。

【0030】実施の形態2．図4はこの発明の実施の形態2の永久磁石型回転電機の固定子の突極の先端部分（3個の突極）を拡大して示す図である。4a～4dは突極1の先端部に設けられた補助溝であり、実施の形態1と同様に全ての固定子突極1に4個ずつ設けられている。また、本実施の形態においては、実施の形態1と同様に補助溝4a～4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部14の幅と同じ幅とされ、また補助溝4a～4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部14

と合わせて周方向に等間隔にされている。

【0031】補助溝4a～4dは、実施の形態1で述べたように、コギングトルク低減のために設けられているが、その深さが適切でないと、うまく補助溝としての機能を果たすことが出来ず、コギングトルクを低減できない場合がある。これは、補助溝によるパーミアンスの脈動と巻線用スロットによるパーミアンスの脈動を等価あるいはほぼ等価にしないとコギングトルクの低減を実現できないからである。

【0032】そこで、突極1の周方向突起部1aの径方向厚さをaとし、各補助溝4a～4dの深さをbとおき、その比 b/a を変化させて、コギングトルクを見ることがとした。このように補助溝4a～4dの深さを、突極1の周方向突起部1aの径方向厚さaで規格化すると、補助溝4a～4dの深さによるコギングトルクの変化を定性的に把握できるため都合が良い。

【0033】ここでも、実施の形態1と同様に、定格トルクは約3Nmで、通電する電流は正弦波状である永久磁石型回転電機を設計し、磁界解析を行った。この解析結果を図5に示す。突極1の周方向突起部1aの径方向厚さaと補助溝の深さbの比 b/a を横軸にとり、縦軸にコギングトルク（定格トルクに対する割合）をとっている。この結果から、 b/a が大きすぎても、小さすぎてもコギングトルクが増大することが分かる。

【0034】すなわち、補助溝4a～4dの深さが浅過ぎても深過ぎても補助溝はうまく機能することができず、コギングトルクの低減が十分でないことが言える訳である。補助溝4a～4dが浅過ぎる場合、補助溝におけるパーミアンスの脈動が巻線用スロット3のそれに比べて小さいと考えられる。その結果、補助溝におけるパーミアンスの脈動と巻線用スロット3のそれとが等価あるいはほぼ等価にならず、コギングトルクの低減が不充分となったと考えられる。逆に補助溝の深さが大きすぎた場合には、補助溝におけるパーミアンスの脈動が巻線用スロット3のそれに比べて大きくなってしまい、補助溝におけるパーミアンスの脈動と巻線用スロット3のそれとが等価あるいはほぼ等価にならず、コギングトルクの低減が不充分となったと考えられる。また、補助溝の深さが大きすぎると、回転電機における等価的なエアギャップが大きくなってしまい、トルクが低下してしまうこともあるため、補助溝の深さは大きすぎないほうが良いのである。さらに、補助溝の深さが大きすぎると、各突極に設けられた4個の補助溝の内、両端の2個の上部においてコアが非常に薄くなり、機械的な強度も低下してしまうことから、補助溝の深さは大きすぎないほうが良いといえる。

【0035】そして、図5の解析結果から、特に $0.25 < b/a < 0.82$ のときにはコギングトルクが大幅に低減でき、定格トルクの約0.5%以下となっていることから、このように補助溝4a～4dの深さと突極1

の周方向突起部1aの径方向厚さaを設定することにより、補助溝の効果を十分に発揮でき、コギングトルクを大幅に低減できる効果があると言える。

【0036】すなわち、この実施の形態の永久磁石型回転電機は、周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石6の磁極を有する回転子8と、永久磁石6と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極1を有する固定子5とを備え、突極1の永久磁石6と対向する面に補助溝が4個4a～4dずつ設けられ、補助溝4a～4dの周方向の幅は、巻線用スロット3の開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝4a～4dの周方向の間隔は、巻線用スロット3の開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、突極1の周方向突起部1aの径方向厚さをa、補助溝4a～4dの深さをbとすると、 $0.25 < b/a < 0.82$ とされている。

【0037】このように、突極1の周方向突起部1aの径方向厚さaと、補助溝4a～4dの深さbを設定することにより、補助溝4a～4dによるパーミアンスの変動と巻線用スロット3によるパーミアンスの変動がほぼ等価になることにより、コギングトルクを大幅に低減することが出来る。

【0038】実施の形態3. 実施の形態1において、巻線用スロットの開口部の幅と補助溝の幅cと巻線用スロットの間隔Wを $0.040 < c/W < 0.125$ なる関係とすれば、固定子の各突極間に発生する漏れ磁束により生じる磁気飽和を緩和し、負荷時のトルク脈動を低減し、また、補助溝と巻線用スロットの開口部におけるパーミアンスの脈動を低減しコギングトルクを低減できることを説明した。また、巻線用スロットと補助溝によるパーミアンスの脈動を低減することができ、コギングトルクも大幅に低減することができるという効果があることも述べた。

【0039】さらに、実施の形態2においては、突極の周方向突起部の径方向厚さをaとし、各補助溝の深さをbとおき、その比 b/a を $0.25 < b/a < 0.82$ なる関係とすれば、補助溝の効果を十分に発揮することができ、コギングトルクを大幅に低減できる効果があるということを説明した。

【0040】しかしながら、いずれか一方の条件しか満たしていない場合には、十分にコギングトルクを低減できない場合がある。すなわち、 $0.040 < c/W < 0.125$ を満たしていても、 $0.25 < b/a < 0.82$ を満たしていない場合、補助溝におけるパーミアンスの脈動と巻線用スロットにおけるパーミアンスの脈動が等価にならず、コギングトルクを十分低減できないことがある。

【0041】また、逆に $0.25 < b/a < 0.82$ を満たしていても、 $0.040 < c/W < 0.125$ を満たさない場合、例えば c/W が大きすぎる場合には、ス

ロット開口幅や補助溝の幅が大きいために、パーミアンスの脈動が大きくなりコギングトルクが十分低減できないことがある。

【0042】このようなことから、 $0.040 < c/W < 0.125$ と $0.25 < b/a < 0.82$ を同時に満たせば、コギングトルク低減に多大な効果を発揮すると考えられる。

【0043】図6にコギングトルクの解析結果を示す。本発明の効果の大きさを説明するために補助溝を設けない場合のコギングトルクと固定子の各突極に4個の補助溝を設け且つ $0.040 < c/W < 0.125$ と $0.25 < b/a < 0.82$ を同時に満たすような補助溝を設けている場合のコギングトルクを示す。この解析結果は、 $c/W = 0.95$ 、 $b/a = 0.375$ とした場合の例である。横軸は回転子の位置を電気角で表している。縦軸はコギングトルクで、分かりやすくするため、補助溝を全く設けない場合のコギングトルクを100%として示している。固定子の各突極に4個ずつ補助溝を設け、且つその補助溝の幅および深さを $0.040 < c/W < 0.125$ と $0.25 < b/a < 0.82$ を同時に満たすようにするとコギングトルクをわずか5%以下にまで低減できていることが分かる。

【0044】このようなことから、この実施の形態の永久磁石型回転電機は、巻線用スロット3の開口部の周方向の間隔をW、巻線用スロット3の開口部の周方向の幅及び補助溝4a~4dの周方向の幅をcとすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ であり、さらに、突極1の周方向突起部1aの径方向厚さをa、補助溝4a~4dの深さをbとすると、 $0.25 < b/a < 0.82$ とされている。

【0045】そのため、固定子8の各突極1間に発生する漏れ磁束により生じる磁気飽和を緩和し、負荷時のトルク脈動を低減するとともに、巻線用スロット3と補助溝4a~4dによるパーミアンスの脈動を低減することができ、コギングトルクも低減することが可能である。また、突極1の周方向突起部1aの径方向厚さと補助溝4a~4dの深さを、上述のように設定することにより、補助溝4a~4dによるパーミアンスの変動と巻線用スロット3によるパーミアンスの変動がほぼ等価になることにより、コギングトルクを大幅に低減することが出来る。

【0046】実施の形態4、実施の形態1乃至3によって負荷時のトルク脈動を低減し、コギングトルクも大幅に低減出来ることを説明してきた。これらの発明によっても負荷時のトルク脈動とコギングトルクの低減に十分効果が得られるが、さらに低減する方法として、スキューを施す方法がある。永久磁石形回転電機の回転子や固定子にスキューを施すことにより、コギングトルクの原因となる永久磁石の起磁力高調波やトルク脈動の原因となる固定子の巻線に流れる電流がつくる起磁力高調波を

打ち消すことが出来るからである。

【0047】図7はこの発明の実施の形態4の永久磁石型回転電機の回転子の斜視図である。図7において、16は全体で円筒状に形成された永久磁石である。永久磁石16は、N極、S極が交互に並ぶように着磁されており、本実施の形態は8極の回転子8となっている。そして、永久磁石16は、図中θで示されているように、θの角度でスキューが形成されるように着磁されている。尚、この磁石の配向は径方向になされたラジアル異方性の磁石とされている。

【0048】次に、スキューを施した構造とすることで、負荷時のトルク脈動とコギングトルクが大幅に低減できることを図8を用いて説明する。図8は図7で示したスキュー角θ（ここでは電気角で表す）を変化させたときに、負荷時のトルク脈動とコギングトルクがどのように変化するかを磁界解析によって求めその結果を示したものである。横軸はスキュー角を電気角で表し、縦軸はコギングトルクと負荷時のトルク脈動を表している。

【0049】ここで、コギングトルクは定格トルクに対する割合で示し、負荷時のトルク脈等は負荷時の平均トルクに対する割合で示している。また、本実施の形態にて扱う永久磁石型回転電機は図7に示されるように8極で、固定子は図には示さないが巻線用のスロットが12個あり、この固定子の各突極にはそれぞれ4個ずつ補助溝が設けられている。さらに、実施の形態1及び2で説明した固定子形状に関するパラメータは $c/W = 0.95$ 、 $b/a = 0.375$ としている。

【0050】図8から明らかなように、コギングトルクはスキューを施すことにより大幅に低減できることが分かる。特に電気角60度において、著しく低減できているが概ね電気角30度から100度付近まではスキューがない場合に比べて、コギングトルクを十分低減できているといえる。一方、負荷時のトルク脈動はおおよそ電気角72度付近にて最小となっていることが分かる。この電気角72度は、この永久磁石型回転電機の負荷時のトルク脈動の主な原因となっている固定子巻線の起磁力の第5高調波を完全に打ち消すことが出来るスキュー角であるから、この角度にて負荷時のトルク脈動が大幅に小さくなったと考えられる。例えば、負荷時のトルク脈動を2%程度まで低減するためには、スキュー角θを電気角65度から電気角78度までの範囲にすればよいということがこの磁界解析の結果から分かる。

【0051】なお、本実施の形態においては、回転子8にスキューを施した例を開示したが、固定子5にスキューを施しても、あるいは、固定子5および回転子8双方にスキューを施しても同様の効果が得られることは言うまでもない。また、本実施の形態においては、回転子8の磁石16は円筒状とし、スキューを着磁によって施した例を開示したが、永久磁石は各磁極が周方向に分離し

た別個の磁石によって形成され、かつ別個の形状にてスキューを施してもよいことは言うまでもない。さらに、本実施の形態においては、スキューを施す方向が一方であるものについて述べたが、スキューを施す周方向の向きを軸方向の中央部付近で反転させるいわゆるV型スキューでもよいことは言うまでもない。

【0052】以上の結果から、固定子の各突極に4個ずつ補助溝を設けた永久磁石型回転電機において、スキューを好ましくは電気角65度〜78度のスキューを施す。さらに好ましくはスキュー角を電気角72度とする。このように、スキューを施した構造とすることにより、コギングトルクや負荷時のトルク脈動を大幅に低減することが可能となる。

【0053】実施の形態5. 図9はこの発明の電動パワーステアリング装置の概念図である。図9において、17はステアリングホイール、18はステアリングホイール17から操舵力を伝えるためのコラムシャフトである。19はウォームギヤ（図では詳細は省略し、ギヤボックスのみ示している）であり、電動機20の出力（トルク、回転数）を回転方向を直角に変えながら伝達し、同時に減速し、アシストトルクを増加させる。21はハンドルジョイントであり、操舵力を伝えると共に、方向も変える。22はステアリングギヤ（図では詳細は省略し、ギヤボックスのみ示している）であり、コラムシャフト18の回転を減速し、同時にラック23の直線運動に変換し、所要の変移を得る。このラック23の直線運動により車輪を動かし、車両の方向転換等を可能とする。

【0054】上記のような電動パワーステアリング装置では電動機20にて発生するトルクの脈動がウォームギヤ19とコラムシャフト18を介して、ステアリングホイール17に伝達される。従って、電動機20が大きなトルク脈動を発生する場合、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来ない。また、電動機がアシストするためのトルクを発生しない状態においても、電動機が大きなコギングトルクを発生するものであれば、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来ない。電動パワーステアリング装置における一般的なギヤ比から換算すると、ステアリングホイールにおいて滑らかなステアリング感覚を得るためには、電動機が発生するコギングトルクは定格トルクの0.5%程度以下、負荷時のトルク脈動を平均トルクの2%程度以下にすれば良いというのが目安となる。

【0055】そこで、例えば、実施の形態4にて説明した電動機20の固定子形状に関するパラメータは $c/W = 0.95$ 、 $b/a = 0.375$ とし、スキュー角を電気角72度とすれば、トルクの脈動は平均トルクの約1%となり、コギングトルクも定格トルクの0.1%以下と非常に小さくなることから、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来る。また、本実施の形態ではコラム

シャフトを電動機のトルクによってアシストするコラムアシスト式の電動パワーステアリング装置を示したが、ラックを電動機のトルクによってアシストするラックアシスト式の場合でもよいことは言うまでもない。

【0056】このように、コギングトルクの低減と負荷時のトルク脈動の低減を両立した実施の形態1〜4の永久磁石型回転電機を電動パワーステアリング装置に組み込むことにより、滑らかなステアリング感覚を得ることが出来るという効果がある。

10 【0057】

【発明の効果】この発明に係る永久磁石型回転電機は、周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石の磁極を有する回転子と、永久磁石と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極を有する固定子とを備え、突極の永久磁石と対向する面に補助溝が4個ずつ設けられ、補助溝の周方向の幅は、巻線用スロットの開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝の周方向の間隔は、巻線用スロットの開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、巻線用スロットの開口部の周方向の間隔を W 、巻線用スロットの開口部の周方向の幅及び補助溝の周方向の幅を c とすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ である。そのため、固定子の各突極間に発生する漏れ磁束により生じる磁気飽和を緩和し、負荷時のトルク脈動を低減することができる。また、巻線用スロットと補助溝によるパーミアンスの脈動を低減することができ、コギングトルクも低減することが可能となる。

【0058】また、この発明に係る他の永久磁石型回転電機は、周方向に所定の間隔を介して配置された複数の永久磁石の磁極を有する回転子と、永久磁石と対向し周方向に所定の間隔を介して配置された複数の突極を有する固定子とを備え、突極の永久磁石と対向する面に補助溝が4個ずつ設けられ、補助溝の周方向の幅は、巻線用スロットの開口部の幅と同じかまたはほぼ同じ幅とされ、補助溝の周方向の間隔は、巻線用スロットの開口部と合わせて、周方向にほぼ等間隔望ましくは等間隔にされ、突極の周方向突起部の径方向厚さを a 、補助溝の深さを b とすると、 $0.25 < b/a < 0.82$ である。そのため、補助溝によるパーミアンスの変動と巻線用スロットによるパーミアンスの変動がほぼ等価になることにより、コギングトルクを大幅に低減することが出来る。

【0059】また、巻線用スロットの開口部の周方向の間隔を W 、巻線用スロットの開口部の周方向の幅及び補助溝の周方向の幅を c とすると、 $0.040 < c/W < 0.125$ であり、さらに、突極の周方向突起部の径方向厚さを a 、補助溝の深さを b とすると、 $0.25 < b/a < 0.82$ である。そのため、固定子の各突極間に発生する漏れ磁束により生じる磁気飽和を緩和し、負荷時のトルク脈動を低減するとともに、巻線用スロットと

補助溝によるパーミアンスの脈動を低減することができ、コギングトルクも低減することが可能である。また、突極の周方向突起部の径方向厚さと補助溝の深さを、このように設定することにより、補助溝によるパーミアンスの変動と巻線用スロットによるパーミアンスの変動がほぼ等価になることにより、コギングトルクを大幅に低減することが出来る。

【0060】また、回転子と固定子との間に相対的にスキューが施され、スキュー角は電気角65度から78度の範囲である。そのため、コギングトルクや負荷時のトルク脈動を大幅に低減することが可能となる。

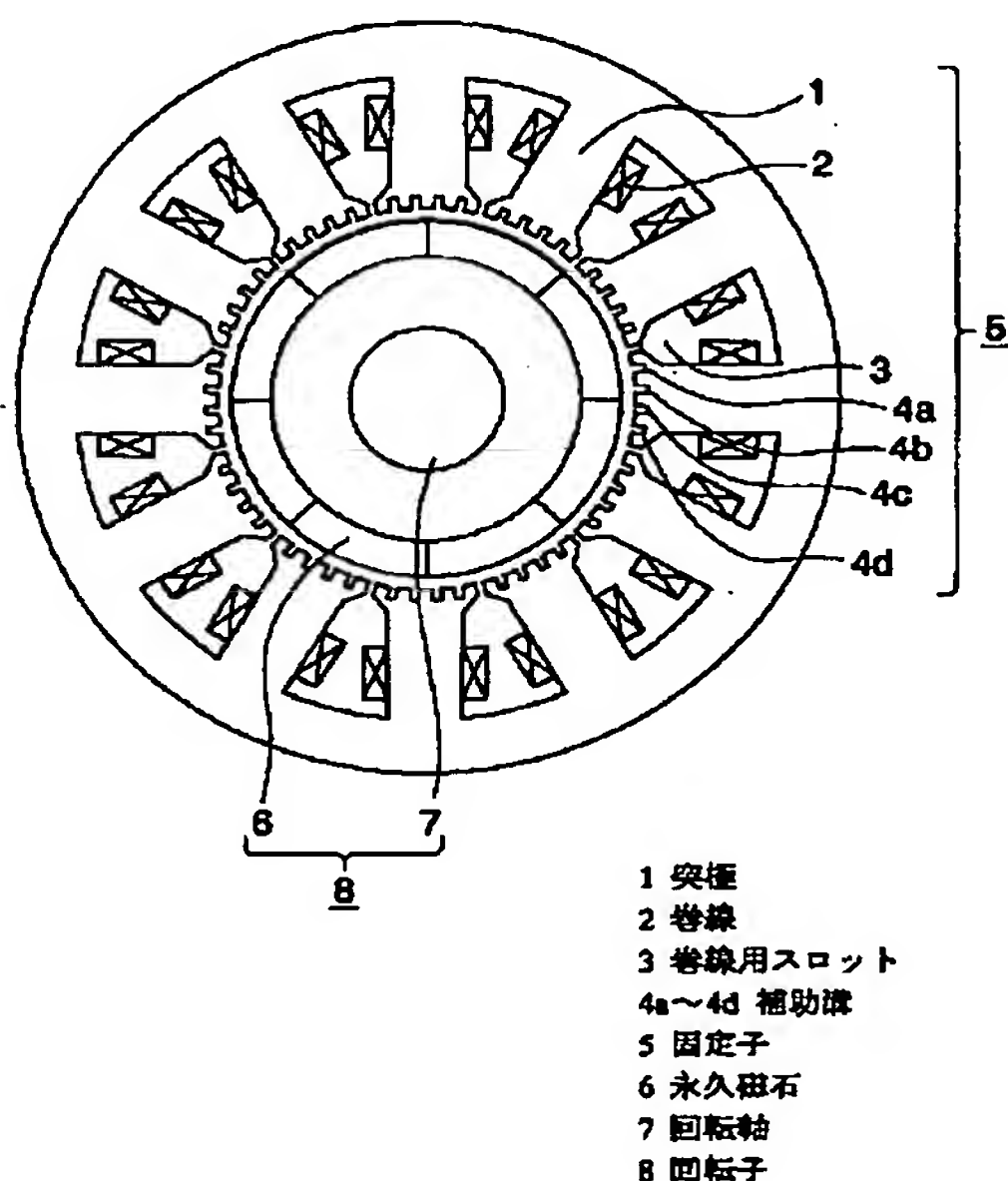
【0061】また、スキュー角は、電気角72度である。そのため、コギングトルクや負荷時のトルク脈動をさらに大幅に低減することが可能となる。

【0062】さらに、この発明に係る電動パワーステアリング装置は、上述の永久磁石型回転電機を駆動源として用いる。そのため、コギングトルクと負荷時のトルク脈動を低減した永久磁石型回転電機を電動パワーステアリング装置に組み込むことにより、滑らかなステアリング感覚を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の実施の形態1の永久磁石型回転電機の断面図である。

【図1】



*【図2】 図1の固定子の突極の先端部分を拡大して示す図である。

【図3】 コギングトルクと負荷時のトルク脈動の解析結果を示すグラフである。

【図4】 この発明の実施の形態2の永久磁石型回転電機の固定子の突極の先端部分を拡大して示す図である。

【図5】 コギングトルクの解析結果を示すグラフである。

【図6】 コギングトルクの解析結果を示すグラフである。

【図7】 この発明の実施の形態4の永久磁石型回転電機の回転子の斜視図である。

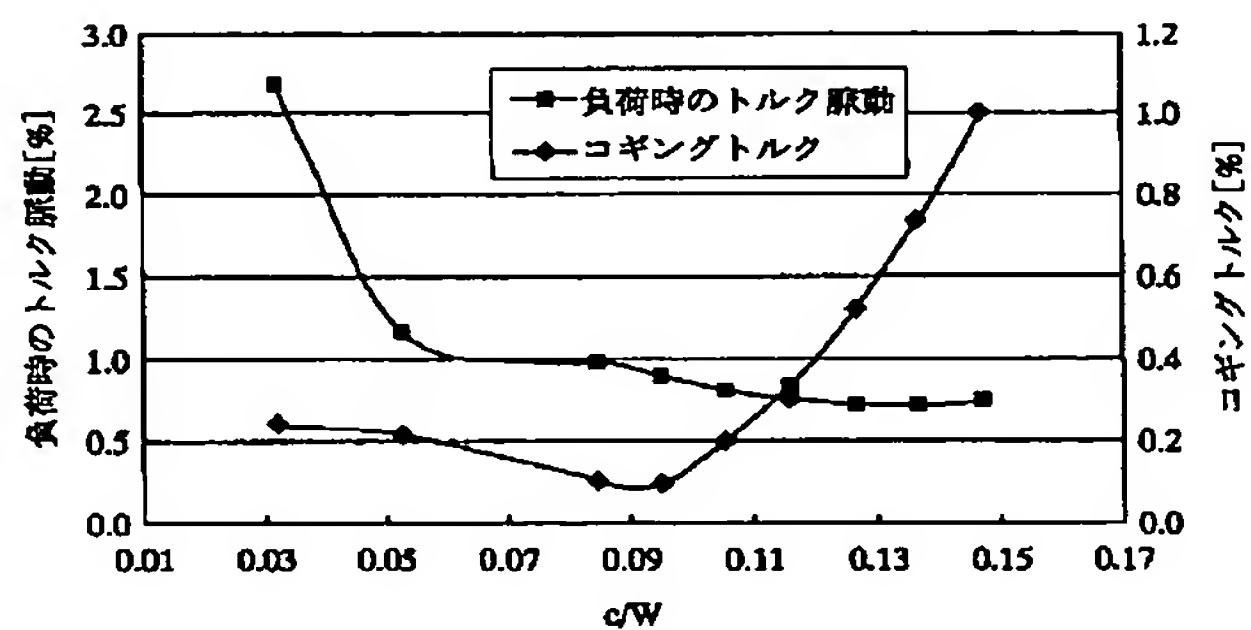
【図8】 スキュー角に対するコギングトルクと負荷時のトルク脈動の解析結果を示すグラフである。

【図9】 この発明の電動パワーステアリング装置の概念図である。

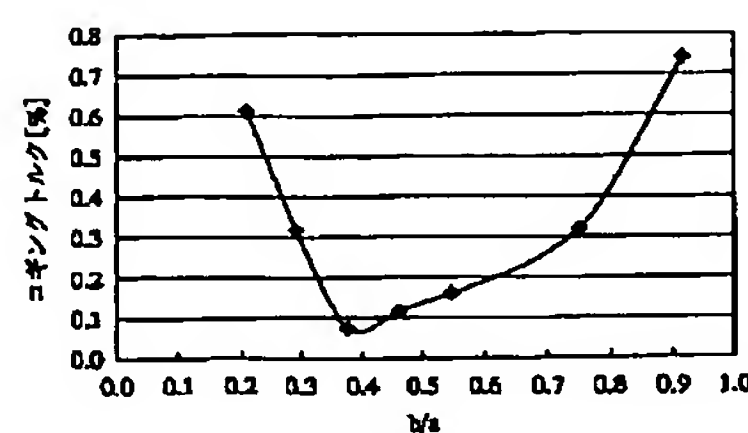
【符号の説明】

1 突極、1a 突極の周方向突起部、2 巻線、3 巻線用スロット、4a~4d 補助溝、5 固定子、6、
16 永久磁石、7 回転軸、8 回転子、c 巻線用
スロット開口部の幅及び補助溝の幅、W 巻線用ス
ロット開口部の間隔、a 突極の周方向突起部の径方向の厚
さ、b 補助溝の深さ、 θ スキュー角。

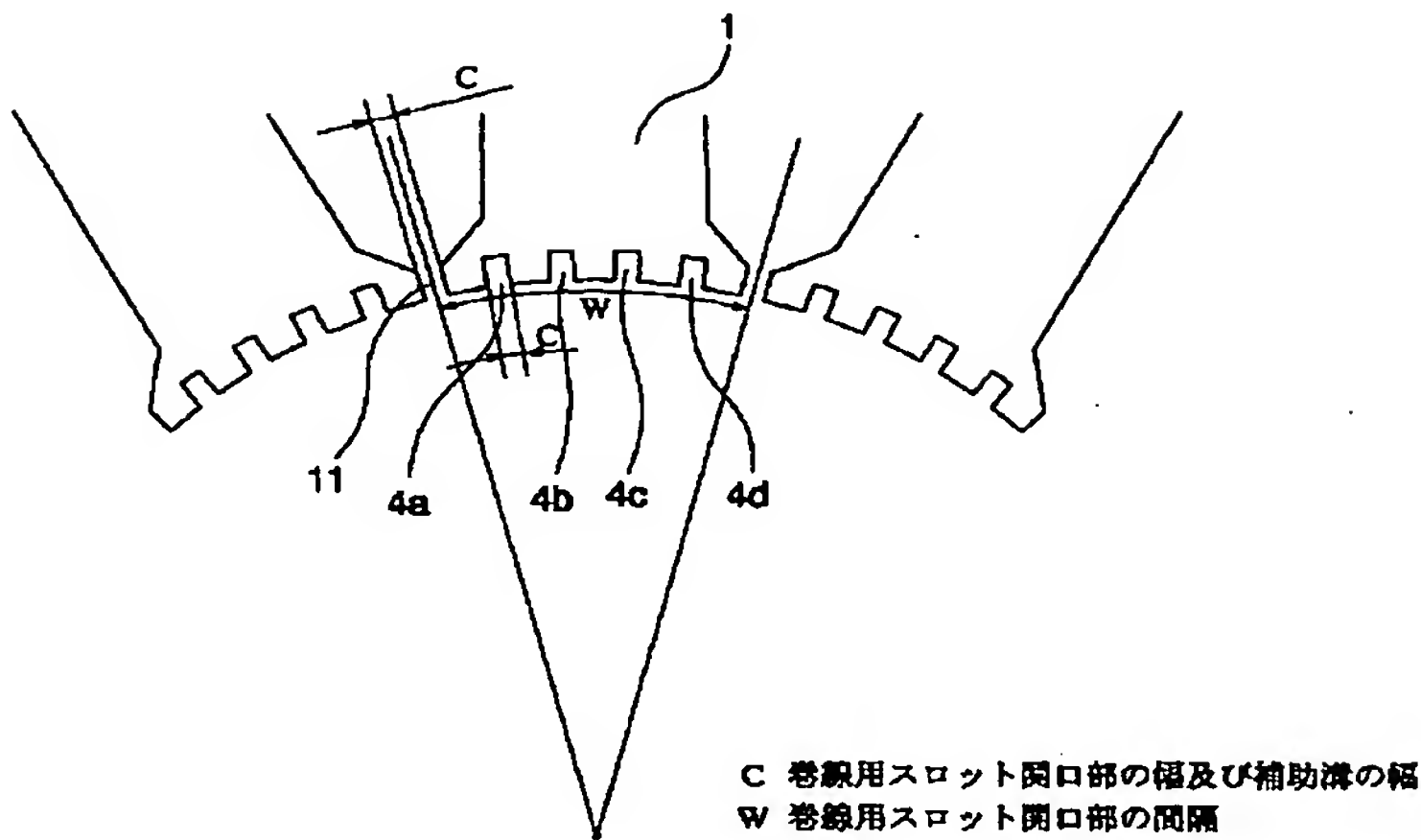
【図3】



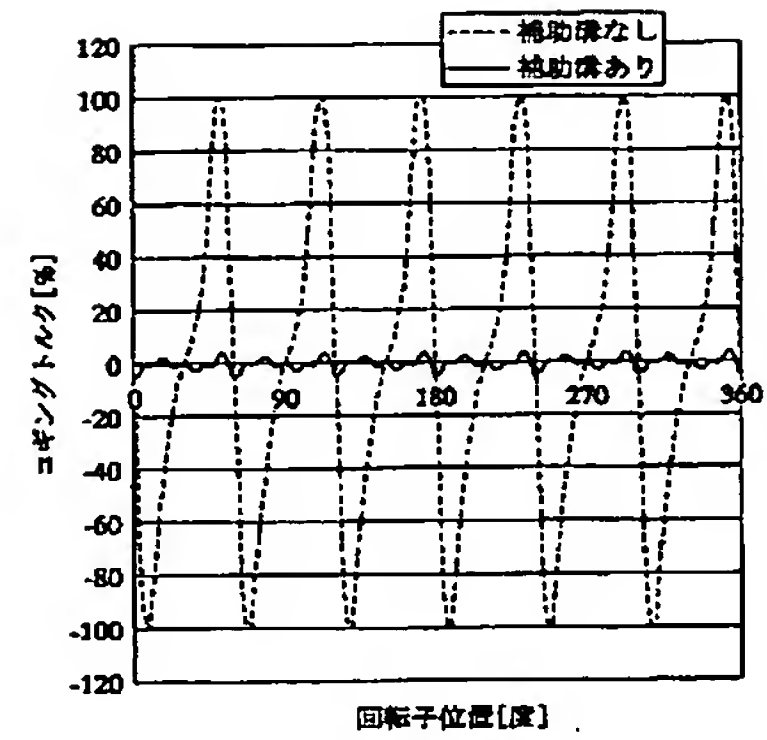
【図5】



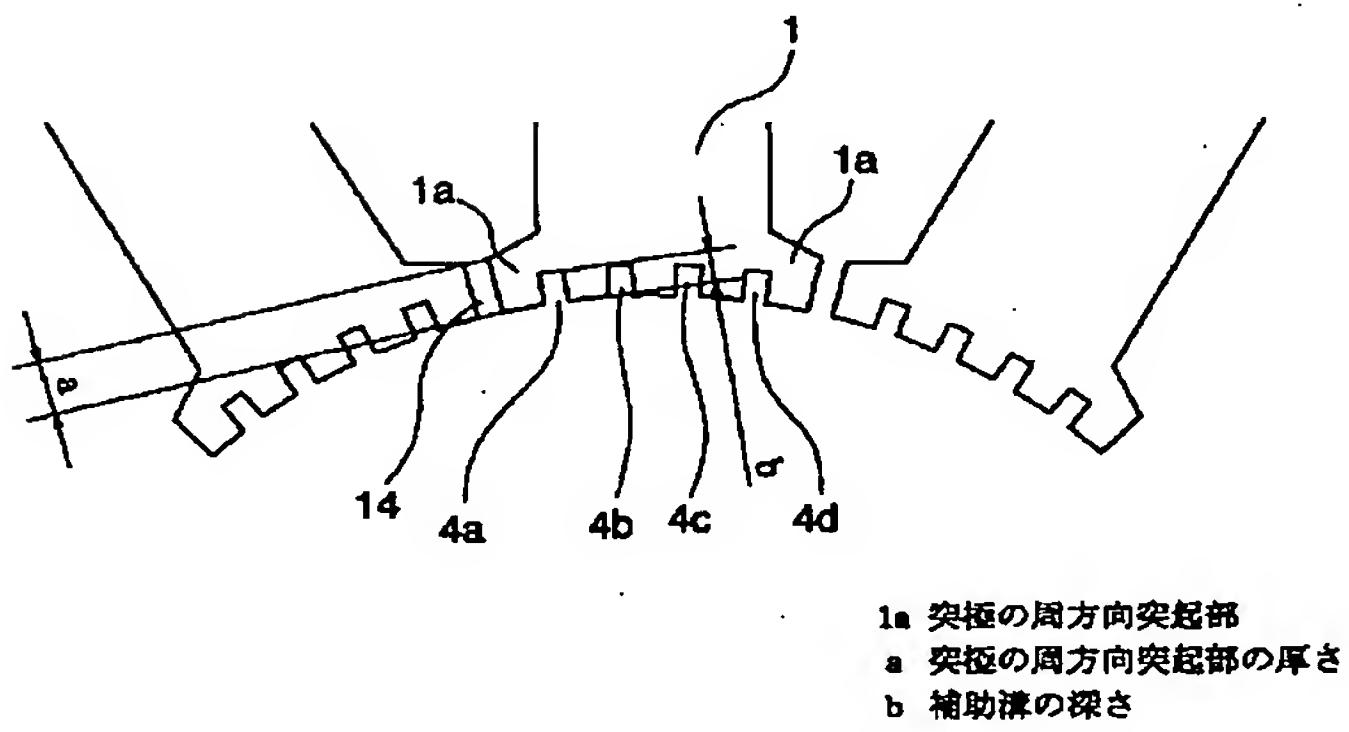
【図2】



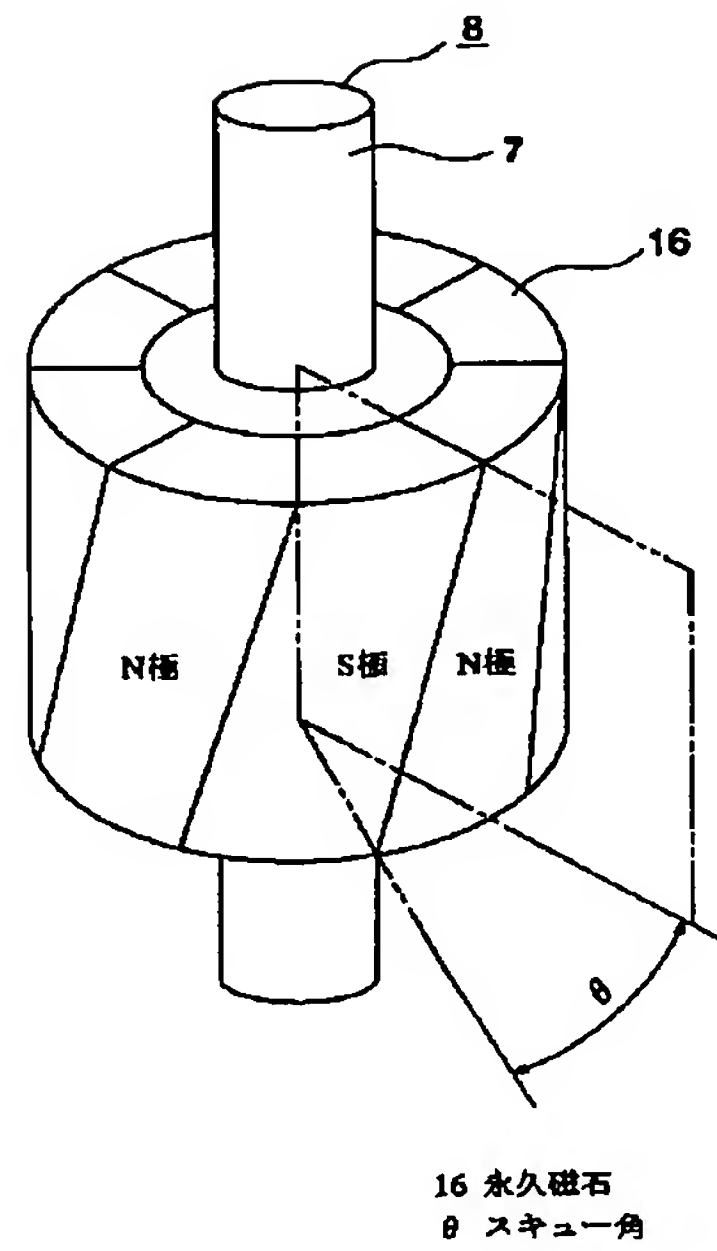
【図6】



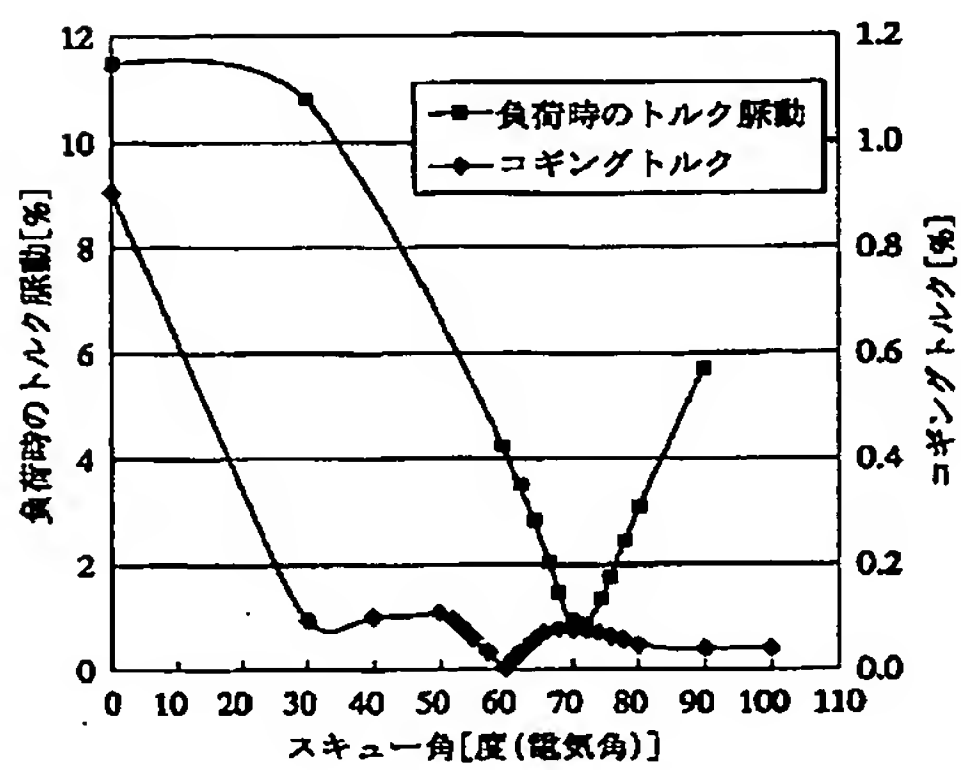
【図4】



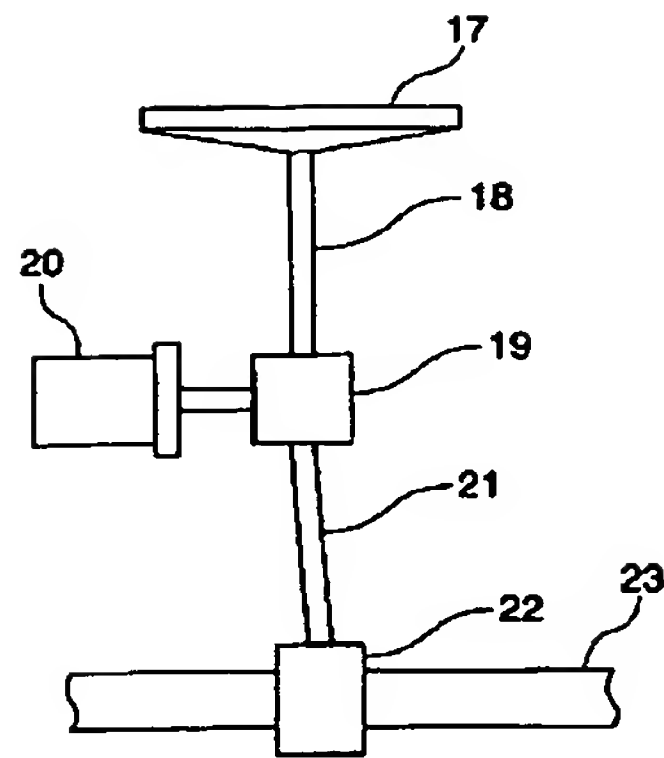
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 岡崎 正文
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三
菱電機株式会社内

Fターム(参考) 3D033 CA03
5H002 AA09 AB06 AE07
5H621 AA02 GA04 GA14 GA15 HH03
5H622 AA02 CA02 CB02 QB03